

## **Нелинейная динамика свободной границы диэлектрической жидкости конечной глубины в тангенциальном электрическом поле**

**Кочурин Евгений Александрович**

*Зубарев Николай Михайлович<sup>1,2</sup>, Кочурин Евгений Александрович<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Институт электрофизики УрО РАН*

<sup>2</sup>*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН*

*[kochurin@iep.uran.ru](mailto:kochurin@iep.uran.ru)*

В работе исследована нелинейная динамика свободной поверхности диэлектрической жидкости конечной глубины с высокой проницаемостью в сильном тангенциальном электрическом поле. Известно [1], что уравнения движения границы допускают точное решение в виде нелинейных локализованных волн произвольной формы, распространяющихся бездисперсионно (т.е. без искажений) по поверхности жидкости, в направлении, либо против направления внешнего поля.

Скорость периодических волн превышает скорость линейных волн и зависит от параметров задачи: глубины жидкости, амплитуды и длины волны. Для слабонелинейных волн получено явное решение задачи; согласно ему прибавка к скорости пропорциональна квадрату амплитуды волны. Численный анализ точного выражения для сильнонелинейной волны показал, что скорость распространения неограниченно возрастает при стремлении амплитуды жидкости к значениям близким к глубине, т.е. при касании поверхностью дна.

Несмотря на то, что нелинейные волны по отдельности могут распространяться без искажений, в результате взаимодействия встречных волн может происходить их деформация. Для исследования процесса взаимодействия встречных волн использовались методы компьютерного моделирования, основанные на применении динамических конформных преобразований области, занимаемой жидкостью, в параметрическую полосу вспомогательных переменных (для глубокой жидкости этот подход был применен в работе [2]). Показано, что на начальных стадиях взаимодействия встречных периодических волн значительной амплитуды наблюдается прямой энергетический каскад, приводящий к перекачке энергии в малые масштабы. Этот процесс приводит к формированию на поверхности жидкости областей с крутым волновым фронтом; в этих точках динамическое давление и давление, оказываемое со стороны электрического поля, испытывают разрыв. Продемонстрировано, что образование высоких градиентов электрического поля и скорости жидкости сопровождается опрокидыванием поверхностных волн; углы наклона границы стремятся к значению 90°, а кривизна поверхности неограниченно возрастает.

Работа выполнена в рамках темы гос. задания 0389-2014-0006 при поддержке РФФИ (проекты 16-38-60002, 16-08-00228, 17-08-00430), Президиума УрО РАН (проект 15-8-2-8) и Совета по грантам Президента РФ (СП-132.2016.1).

Список публикаций:

[1] N. M. Zubarev. // *Phys. Lett. A* 2004, V. 333, P. 2844.

[2] Н. М. Зубарев, Е.А. Кочурин // *Письма в ЖЭТФ* 2014, Т. 99, Вып. 11, С. 729.

## **Исследование формирования убегающих электронов в воздушном ускоряющем промежутке**

**Мамонтов Юрий Игоревич**

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина*

*Лисенков Василий Викторович, к.ф.-м.н.*

*[mamontov.ura.1994@yandex.ru](mailto:mamontov.ura.1994@yandex.ru)*

В последнее время возрос интерес к явлению так называемых «убегающих электронов» и к возможностям его использования для генерации мощных высокоэнергетических электронных пучков высокой плотности. Данное явление заключается в том, что в полностью ионизованной плазме (как, например, в токамаках), находящейся в достаточно сильном электрическом поле, реализуется режим движения электронов, при котором электроны на длине свободного пробега получают от поля больше энергии, чем теряют в столкновениях, и вследствие этого постоянно ускоряются полем [1]. Отсюда второе название явления «убегания» — режим непрерывного ускорения. Однако «убегающие электроны» могут наблюдаться не только в полностью ионизованной плазме, но и в газах малой плотности, а также в мощных газовых разрядах, применяемых, например, для накачки лазеров. Кроме того, ведутся работы по изучению возможности генерации «убегающих электронов» на стадии формирования катодного слоя тлеющего разряда [2].

В лаборатории квантовой электроники Института электрофизики с середины 2000-х годов ведутся работы по исследованию режима непрерывного ускорения электронов и возможности его применения для

генерации сильноточных электронных пучков. Особенность данного исследования заключается в том, что в нем предполагается отказаться от использования вакуума в ускоряющем промежутке, а ускорение электронов производить непосредственно в предварительно разреженном воздухе. Начиная с 2008 года сотрудникам лаборатории, занимающимся данным вопросом, был выдан целый ряд патентов на изобретения и идеи изобретений [3-5]. По замыслу авторов [5], устройство для генерации «убегающих» электронов должно представлять из себя газонаполненный диод (газ — атмосферный воздух), состоящий из холодного заземленного катода и сетчатого анода, на который подается высоковольтный импульс и через который выводится электронный пучок. Вокруг катода, перекрывая часть межэлектродного промежутка, располагается диэлектрик — кварцевая трубка. В этой трубке размещается модуль локального нагрева газа для обеспечения достаточной для перехода электронов в режим убегания приведенной напряженности поля  $E/N$  (здесь  $E$  — напряженность электрического поля,  $N$  — концентрация частиц газа). Нагрев газа может осуществляться, например, при помощи факела от лазерного луча или дополнительного искрового разряда. Случай нагрева газа искрой представляет наибольший интерес, т.к. существенно упрощает и удешевляет конструкцию всего прибора.

Известно, что искровой канал имеет температуру более  $10^4$  К. При иницировании искрового разряда в малом объеме диэлектрической трубки вблизи катода происходит резкий скачок давления газа внутри трубки (согласно уравнению Менделеева-Клапейрона в форме  $p = NkT$ , где  $T$  — температура газа,  $k$  — постоянная Больцмана). Однако давление в ней быстро сравнивается с давлением окружающей среды (фактически, с атмосферным). Температура же релаксирует не так быстро, поэтому после искрового пробоя промежутка трубку покидает основная часть молекул газа (то есть существенно снижается  $N$ , исходя из того же уравнения Менделеева-Клапейрона). Если после восстановления электрической прочности промежутка, но не позже релаксации температуры (а, следовательно, и концентрации частиц) быстро подать высоковольтный импульс ускоряющего напряжения (желательно — с как можно более крутым передним фронтом), то эмиттированные из катода электроны, попав в область разреженного газа, могут перейти в режим непрерывного ускорения, быстро набрать энергию и пройти весь остальной промежуток, почти не взаимодействуя с газовой средой. В результате на выходе устройства генерируется пучок высокоэнергетичных электронов.

Кроме ограничения объема, предназначенного для локального нагрева газа, диэлектрическая трубка также может служить и для улучшения свойств генерируемого электронного пучка. Часть электронов при своем движении через ускоряющий промежуток будет оседать на этой трубке и своим полем фокусировать остальной пучок, тем самым повышая его плотность и направленность.

В течение последних месяцев осуществляется сборка прототипа прибора, работающего на вышеописанном принципе. На его основе будет проведено полноценное исследование генерируемого электронного пучка. Планируется, что основная высоковольтная часть прибора (генератор ускоряющего импульса) будет схожа с генератором, описанным в [6]. Задача нагрева газа в диэлектрической трубке с помощью искрового разряда на данный момент уже решена.

Параллельно с проведением экспериментальной части работы строится теоретическая модель формирования и распространения электронного пучка. Фактически, описание динамики электронов в одномерном приближении сводится к решению системы дифференциальных уравнений, представленной в [7]. Для решения этой системы уравнений необходимо знать численные значения кинетических коэффициентов: частоты ионизации, дрейфовой скорости электронов и частоты перехода электронов в режим убегания. Чтобы оценить эти коэффициенты в различных условиях эксперимента была написана программа для численного моделирования пролета электронов через газонаполненный промежуток при различных напряженностях внешнего электрического поля, различных концентрациях частиц среды и др. Исходными данными для этой программы послужили значения сечений ионизации, упругого рассеяния электронов и возбуждения электронных и колебательных состояний азота (из которого, в основном, и состоит воздух) для различных энергий электронов [8]. В настоящее время идет отладка алгоритма данной программы.

Таким образом, ведутся активные работы по исследованию и генерации «убегающих» электронов в газонаполненном ускоряющем промежутке. Уже достигнуты успехи в части создания системы нагрева газа и написания программы для численного расчета кинетических коэффициентов, которые будут использованы в теоретическом описании формируемого электронного пучка. Создание устройства, использующего вышеописанную концепцию формирования «убегающих» электронов, позволит в будущем упростить и удешевить существующие устройства для генерации корпускулярного и волнового излучения. Кроме того, отказ от использования вакуума в ускоряющем промежутке позволит значительно увеличить их ресурс работы за счет отказа от использования фольги для разделения пространства дрейфа и ускоряющего промежутка.

Список публикаций:

- [1] Тарасенко В. Ф., Яковленко С. И. // УФН. 2004. Т. 174. №9. С. 953.
- [2] Lisenkov V. V. // 19- th International Symposium on High Current Electronics. Abstracts. Tomsk: Tomsk Pol. University Publ. House. 2016. P. 134.
- [3] Лисенков В. В., Мاستюгин Д. С., Осипов В. В., Соломонов В. И. // Патент RU 2317660 C1. 2008.
- [4] Соломонов В. И., Мастюгин Д. С. // Патент RU 2376731 C1. 2009.
- [5] Осипов В. В., Лисенков В. В., Тихонов Е. В. // Патент RU 2581618 C1. 2014.
- [6] Morimoto M., Arai R., Omatsu K., Teranishi K., Shimomura N. // IEEE Trans. On Plasma Sci. 2016. V.4. No. 11. P. 2874.
- [7] Lisenkov V.V., Osipov V.V. // Rus. Phys. J. 2012. V. 55. No. 10-3. P. 256.
- [8] Cartwright D. C., Trajmar S., Chutjian A., Williams W. // Phys. Rev. A. 1977. V. 16. No. 3. P. 1041.